中国生态农业学报 2016 年 2 月 第 24 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2016, 24(2): 173−182

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150960

一穴多株种植对夏玉米群体质量和产量的影响*

王云奇 李金鹏 王志敏 宋文品 韩美坤 邓万云 张英华**

(中国农业大学农学院/作物生态生理实验室 北京 100193)

摘 要 增加种植密度是玉米高产的重要手段，但是种植密度的持续增加也带来一系列问题，其中高密群体的郁闭问题已成为限制进一步增加种植密度的主要因素之一。为缓解夏玉米高密度群体的郁闭状况，改善高密度种植下的玉米群体质量和产量形成，本试验在 82 500 株·hm^{-2} 密度下设置了一穴 1 株(P1)、一穴 2 株(P2)和一穴 3 株(P3)3 个处理，分析了一穴多株对夏玉米各生育时期的叶面积、干物质、光合势、相对生长率、净同化率、作物生长速率、粒叶比和产量的影响。结果表明，与对照 P1 相比，P2 和 P3 吐丝期单株叶面积分别增加 10.7%~21.9%和 7.3%~16.7%，吐丝后 20 d 分别增加 13.5%~21.9%和 9.4%~12.7%; P2 和 P3 吐丝期和成熟期干物质积累显著高于 P1(P<0.05)。一穴多株种植提高了夏玉米 6 叶展以后的光合势，P2 的提高幅度小于 P3; P2、P3 吐丝后 20 d 到成熟期相对生长率比 P1 分别高 30.4%~190.7%和 33.9%~183.5%，净同化率分别高 16.1%~161.9%和 30.7%~155.8%。采用一穴多株种植可以提高作物的生长速率、粒叶比和籽粒产量，P2 和 P3 分别比 P1 增产 5.8%~23.5%和 4.9%~18.9%。粒重/叶面积、粒数/叶面积与籽粒产量呈显著直线正相关(R^2=0.94, P<0.000 1 和 R^2=0.76, P<0.001)。可见，在高密种植条件下，采用一穴多株种植可以改善夏玉米群体质量、提高产量。本研究推荐高密度下一穴 2 株种植方式。

关键词 一穴多株 夏玉米 群体质量 净同化速率 产量
中图分类号: S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)02-0173-10

Effects of more plants per hill on population quality and yield of summer maize*

WANG Yunqi, LI Jinpeng, WANG Zhimin, SONG Wenpin, HAN Meikun, DENG Wanyun, ZHANG Yinghua**

(College of Agronomy / Crop Ecophysiology Laboratory, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract It is important to get high maize yield by increasing planting density, but this could have some shortfalls (e.g., canopy closure) which limit further increase in planting density. In order to alleviate canopy closure of summer maize under high density and to improve population quality and yield, a 2-year field experiment was conducted at the Wuqiao Experimental Station of China Agricultural University. Three treatments were designed in the field, including one plant per hill (P1), two plants per hill (P2), and three plants per hill (P3) under planting density of 82 500 plant·hm^{-2}. Then the study estimated leaf area per plant, dry matter (DM), photosynthetic potential (PP), relative growth rate (RGR), net assimilation rate (NAR), crop growth rate (CGR), grain-leaf area ratio and grain yield. Leaf areas under P2 and P3 treatments at silking stage (R1) increased by 10.7%–21.9% and 7.3%–16.7%, respectively. At about 20 days after silking (DAS), leaf areas under P2 and P3 treatments increased by 13.5%–21.9% and 9.4%–12.7%, respectively, compared with P1 treatment. The DM of P2 and P3 treatments at R1 and physiological maturity stage (M) was significantly higher (P < 0.05) than that of P1 treatment. PP was improved at 6-leaf stage under P2 treatment, but decreased with increasing number of plants per hill. Compared with P1 treatment, RGR

* 公益性行业科研专项(201303133)、国家自然科学基金项目(31401297)和河北省科技计划项目(14227008D)资助
** 通讯作者: 张英华，主要从事作物高产生态生理研究。E-mail: zhangyh1216@126.com
王云奇，主要从事作物高产和资源高效利用研究。E-mail: wyqay163@163.com
收稿日期: 2015−09−02 接受日期: 2015−11−13

* This study was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (No. 201303133), the National Natural Science Foundation of China (No. 31401297) and the Science and Technology Program of Hebei Province (No. 14227008D).
** Corresponding author, E-mail: zhangyh1216@126.com
Received Sep. 2, 2015; accepted Nov. 13, 2015

from DAS20 to M increased by 30.4%–190.7% and 33.9%–183.5%, NAR increased by 16.1%–161.9% and 30.7%–155.8%, respectively, under P2 and P3 treatments. Also CGR, grain-leaf area ratio and grain yield were enhanced under P2 and P3 treatments. Compared with P1 treatment, yield under P2 and P3 treatments increased by 5.8%–23.5% and 4.9%–18.9%, respectively. It was noted that ear number per hectare and grain number per ear under P2 treatment slightly increased and the thousand-grain weight increased obviously over that of P1 treatment. Analysis of ear number per hectare, grain number per ear and thousand-grain weight after two years of growth showed that ear number per hectare dropped slightly, grain number per ear increased slightly, and thousand-grain weight evidently increased under P3 treatment, compared with P1 treatment. Yield showed significant and positive linear correlation with grain weight/leaf area ratio (R^2 = 0.94****) and grain number/leaf area ratio (R^2 = 0.76***). Thus under high density conditions, more plants per hill improved the processes of leaf area and dry matter accumulation that in turn improved population quality. The increment in grain yield under more plants per hill was mainly due to the enhancements of thousand-grain weight and grain number per ear. In conclusion, population quality, yield and yield components were improved in two plants per hill treatment. Thus based on this study, two plants per hill planting pattern was recommended as the best performing planting pattern of maize.

Keywords More plants per hill; Summer maize; Population quality; Net photosynthesis; Yield

高密度种植是目前进一步挖掘夏玉米高产潜力的一个重要手段。种植密度决定了产量三要素(穗数、穗粒数和粒重)中的穗数和穗粒数[1−3], 因此, 提高种植密度就意味着增加穗数。但是随着种植密度增加, 群体愈加郁闭, 透光率变差[4−6], 中下部叶片早衰, 光合效率降低[7], 穗粒数、千粒重和出籽率降低, 秃尖变长, 最终影响花后干物质积累和籽粒产量。前人研究证明产量和密度之间是一个抛物线的关系, 种植密度增加到一定值, 产量就会逐渐下降[8−10]。而在华北地区, 夏玉米季高温高湿的环境使高密种植的这些缺点更加突出。因此, 如何通过种植方式弥补夏玉米增密过程所产生的不足之处是一个值得研究的课题。

高产群体结构是实现高产的前提。群体结构特性通过光合有效辐射的截获、吸收和透射影响作物群体光分布与光合特性, 最终影响作物光合作用、干物质积累和产量形成[11]。所以, 改善夏玉米高密度群体的光合作用效率和物质生产能力主要在于优化群体结构、改善群体通风透光能力、增加花前群体的叶面积、延缓花后叶片衰老。种植方式是协调高密度条件下个体通风受光条件及营养状况并最终作用于产量的因素之一[12], 能调节玉米群体结构、改善玉米田间小气候、提高资源利用效率。目前我国玉米的种植方式有等行距栽培、宽窄行栽培、双株栽培、精量栽培和一穴多株栽培等种植方式[13−14]。其中, 一穴多株栽培是指在 1 个穴里种植 2 株及 2 株以上的玉米。前人对通对宽窄行种植[15]、化学调控[16]、间套作[17]等措施优化群体结构的研究较多, 但是有关夏玉米一穴多株高密度种植下群体质量和产量的系统研究尚少见报道。本研究在相对较高种植密度(82 500 株·hm^{-2})下, 通过一穴多株(一穴 2 株、一穴 3 株)的种植方式来改变夏玉米群体结构, 考察不同处理的群体质量, 主要包括光合势(photosynthetic potential, PP)、净同化率(net assimilation rate, NAR)、相对生长率(relative growth rate, RGR)、作物生长速率(crop growth rate, CGR)和粒叶比等表征群体冠层结构特性(群体质量)的数量指标[18], 以及产量和产量构成因素的变化, 旨在为夏玉米一穴多株高产技术的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况和试验设计

试验于 2013 年和 2014 年在中国农业大学吴桥实验站(北纬 37°41′02″, 东经 116°37′23″, 海拔 14~22 m)进行。该地区全年光照 2 724.8 h, 年平均气温 12.9 ℃, 无霜期 201 d, 试验区属海河平原黑龙港流域中部, 暖温带季风气候, 年降水量历年平均 562 mm, 主要分布在 6—8 月份。土壤为冲积型盐化潮土, 壤质底黏, 地下水位 7~9 m, 2 m 土体有效储水 420 m^3。耕作层土壤 pH 8.12, 有机质含量 11.1 g·kg^{-1}, 全氮 0.9 g·kg^{-1}, 速效磷 18.0 mg·kg^{-1}, 速效钾 78.8 mg·kg^{-1}, 土壤肥力中等。试验年份气象状况见图 1。该地区 2013 年 6 月中下旬、8 月中下旬和 9 月中旬(夏玉米苗期至 12 叶展、吐丝至吐丝后 15 d 和吐丝后 25~35 d)发生严重干旱。

供试夏玉米品种为‘郑单 958’, 播前磷肥、钾肥和氮肥作为基肥一次性施入, 用量为氮肥(尿素) 240 kg(N)·hm^{-2}, 磷肥(过磷酸钙)105 kg·hm^{-2}, 钾肥(硫酸钾)120 kg·hm^{-2}。生育期间无追肥。采用随机区组设计, 种植密度为 82 500 株·hm^{-2}, 设置 3 个处理: 一穴 1 株(P1)、一穴 2 株(P2)、一穴 3 株(P3), 每个处理 3 次重复。小区面积 6 m×10 m, 行距 60 cm。

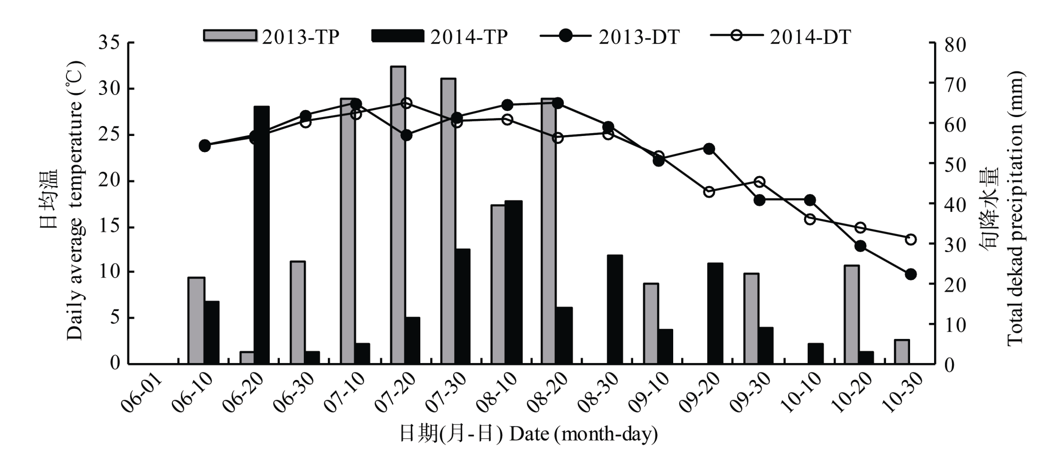


图 1　2013 年和 2014 年夏玉米生育期内旬降水量和日均温

Fig. 1　Total dekad precipitation (TP) and daily average temperature (DT) during the maize growing seasons in 2013 and 2014

播种前进行晒种, 除去秕粒和破粒。每年的 6 月 16 日进行人工播种(P1 每穴播种 2 粒种子, P2 每穴播种 4 粒种子, P3 每穴播种 5 粒种子), 播种后浇蒙头水, 全生育期内不进行灌溉。4 叶展去除每穴的最弱的 1 株苗, 7 叶展定苗(留下长势一致的苗)。杂草和病虫害得到很好控制。8 叶展每小区选定茎粗、株高和长势一致的 20 穴挂牌标记, 用于干物质和叶面积的测定。

1.2　测定项目及方法

单株叶面积和干物质测定: 于苗期(VE)、6 叶展(V6)、12 叶展(V12)、吐丝期(R1)、吐丝后 20 d(DAS20)和生理成熟期(M)每小区选取有代表性的 3 穴, 测量每株绿叶叶片的长与宽, 按照公式: 叶面积=长×宽×0.75 计算每片叶面积, 而后将每株所有叶片的叶面积加在一起即为单株叶面积, 然后分茎和叶两部分, 在 105 ℃下杀青 15~20 min, 然后于 80 ℃烘至恒重, 测量干物质重量。

空秆率测定: 成熟期每小区选取中间 4 行, 调查每行的总株数和空秆数(穗粒数少于 50 粒视为空秆), 按照公式: 空秆率=空秆数/总株数计算空秆率。

产量测定: 在成熟期调查每小区实际穗数, 收获中间 4 行(每行 4 m), 称所有果穗总鲜重, 按平均鲜穗重从所收果穗中随机选取 20 穗, 调查穗粒数、千粒重, 测定出籽率和含水率, 计算实际产量(按 14%折算含水率)。

1.3　计算方法

光合势(PP, $\times10^4 m^2\cdot d\cdot hm^{-2}$)= $(L_1\times10\ 000+L_2\times10\ 000)\times(t_2-t_1)/2$　(1)

相对生长率(RGR, d^{-1})=$(\ln W_2-\ln W_1)/(t_2-t_1)$　(2)

净同化率(NAR, $mg\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$)=$[(\ln L_2-\ln L_1)/(L_2-L_1)]\times[(W_2-W_1)/(t_2-t_1)]$　(3)

作物生长速率(CGR, $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$)=$(W_2-W_1)/[A\times(t_2-t_1)]$　(4)

粒重/叶面积($mg\cdot cm^{-2}$)=籽粒产量/吐丝期叶面积　(5)

粒数/叶面积($grain\cdot cm^{-2}$)=总结实粒数/吐丝期叶面积　(6)

式中: L_1、L_2 分别为 t_1、t_2 时的群体叶面积指数(单株叶面积×种植密度), W_2、W_1 分别为 t_1、t_2 时的干重($kg\cdot hm^{-2}$), A 为土地面积(hm^2)。

1.4　数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据计算和作图, 采用 SAS9.0 软件中的 GLM 程序、Duncan 程序分别进行 F 检验和多重比较($P<0.05$)[19]。利用 SAS9.0 软件中的 PROC CORR 程序对两年的产量、产量构成要素, 以及各生育时期的光合势、相对生长率、净同化率、作物生长速率进行相关分析[19]。

2　结果与分析

2.1　一穴多株种植对夏玉米叶面积的影响

一穴多株处理(T)对各时期的叶面积有显著影响($P<0.000\ 1$)。2013 年, 6 叶展 P1 的叶面积最大, P3 最小; 12 叶展时 P2 显著高于 P1 和 P3($P<0.05$), P1 与 P3 之间差异不显著; 吐丝期和吐丝后 20 d 和成熟期叶面积呈现出 P2>P3>P1 的趋势, 且处理间差异显著(表 1)。2014 年, 6 叶展时 P1 显著大于 P2 和 P3($P<0.05$), 吐丝期和吐丝后 20 d 与 2013 年规律相似; 12 叶展和成熟期叶面积均表现出 P2>P1>P3 (表 1)。可见, 一穴多株种植对 12 叶展到吐丝期的叶面积有增加效应, 对吐丝后叶面积下降有延缓效应, 并且该效应随穴内株数的增加而减弱。年份(Y)对 6 叶展、12 叶展、吐丝期和成熟期的叶面积有显著影响($P<0.000\ 1$), 2014 年除吐丝期和吐丝后 20 d 的平均叶面积与 2013 年相当外, 其余时期均大于 2013 年(表 1)。处理×年份(P×Y)对 6 叶展($P<0.001$)、12 叶展($P<0.000\ 1$)、吐丝期($P<0.000\ 1$)、吐丝后 20 d

表 1　一穴多株种植对夏玉米不同生育期叶面积的影响

Table 1　Effects of more plants per hill on leaf area of summer maize at different growth stages　$cm^2 \cdot plant^{-1}$

年份 Year (Y)	处理 Treatment (T)	生育期 Growth stage				
		V6	V12	R1	DAS20	M
2013	P1	817.1±4.9a	4 788.8±33.4b	6 525.2±9.4c	5 764.7±132.3c	3 058.0±32.4c
	P2	780.1±25.2b	5 516.5±107.2a	7 222.5±53.8a	6 540.4±29.3a	3 914.6±28.9a
	P3	614.8±15.3c	4 924.2±74.7b	7 001.1±99.3b	6 307.3±92.7b	3 278.0±93.0b
	平均 Mean	737.3	5 076.5	6 916.3	6 204.2	3 416.9
2014	P1	1 226.1±4.8a	5 733.5±16.6a	5 833.9±52.9c	5 572.4±9.6c	4 292.0±128.0b
	P2	1 138.4±15.5b	5 909.8±11.6a	7 114.0±37.2a	6 795.3±64.5a	4 674.5±16.6a
	P3	1 150.7±50.6b	4 465.1±182.4b	6 810.0±117.5b	6 280.5±25.7b	3 977.6±167.3c
	平均 Mean	1 171.7	5 369.5	6 585.9	6 216.1	4 314.7
显著性 Significance	T	****	****	****	****	****
	Y	****	****	****	ns	****
	T×Y	***	****	****	***	***

P1: 一穴 1 株; P2: 一穴 2 株; P3: 一穴 3 株。V6: 6 叶展; V12: 12 叶展; R1: 吐丝期; DAS 20: 吐丝后 20 d; M: 成熟期。同列不同小写字母表示在 5%水平差异显著; *、**、***和****分别表示在 $P<0.05$、$P<0.01$、$P<0.001$ 和 $P<0.0001$ 水平差异显著; ns 表示差异不显著。下同。
P1: one plant per hill; P2: 2 plants per hill; P3: 3 plants per hill. V6: 6-leaf stage; V12: 12-leaf stage; R1: silking stage; DAS 20: 20 days after silking; M: maturity stage. Different letters in the same column mean significant difference at 5% level; *, **, *** and **** denote significant difference at $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$ and $P < 0.000 1$, respectively; ns means no significant difference. The same below.

(P<0.001)和成熟期的叶面积(P<0.001)均有显著影响(表 1)。以上说明气象条件(降雨、温度、光照)是造成叶面积年际间差异和产生年份与处理间互作效应的主要因素(表 1)。

2.2 一穴多株种植对夏玉米干物质积累的影响

一穴多株处理(T)对玉米各时期干物重有显著影响。在 2013 年, 6 叶展和 12 叶展 P2 和 P3 的干物重显著高于对照 P1(P<0.05), P2 与 P3 之间差异不显著; 吐丝期 P2 最高, P1 最低; 吐丝后 20 d 表现出 P2 最高, P3 最低; 成熟期, P2 显著高于 P1 和 P3 (P<0.05), P1 与 P3 之间差异不显著(表 2)。2014 年 6 叶展、吐丝期、成熟期干物质变化与 2013 年规律相似; 12 叶展表现出 P2 最高、P3 最低; 吐丝后 20 d 表现出 P2 最高、P1 最低(表 2)。可见, 一穴多株种植可以显著增加夏玉米各生育时期干物质积累量, 并且随穴内株数的增多, 增加效应减弱。年份(Y)对 12 叶展、吐丝期和成熟期干物重有显著影响(P<0.000 1), 2014 年 6 叶展和吐丝后 20 d 的平均干物质积累量与 2013 年相当, 其余时期均大于 2013 年(表 2)。处理×年份(P×Y)对 12 叶展(P<0.000 1)、吐丝期(P<0.01)、吐丝后 20 d(P<0.000 1)、成熟期干物重(P<0.000 1)均有显著影响(表 2)。

表 2　一穴多株种植对夏玉米不同生育期干物质积累的影响

Table 2　Effects of more plants per hill on dry matter accumulation of summer maize at different stages　$g \cdot plant^{-1}$

年份 Year (Y)	处理 Treatment (T)	生育期 Growth stage				
		V6	V12	R1	DAS20	M
2013	P1	8.4±0.4b	44.1±1.4b	101.6±0.6c	167.4±2.2a	179.1±6.4b
	P2	10.1±0.6a	53.9±3.4a	119.4±2.8a	168.9±1.4a	205.6±1.6a
	P3	10.6±0.6a	50.9±1.5a	107.6±2.2b	154.0±2.7b	186.4±2.7b
	平均 Mean	9.7	49.6	109.5	163.4	190.4
2014	P1	9.4±0.2b	64.5±1.2b	114.4±3.9b	141.2±12.0b	217.8±0.4c
	P2	10.5±0.1a	68.3±1.0a	145.5±3.7a	177.6±1.4a	313.6±5.4a
	P3	10.3±0.2a	51.1±0.7c	137.9±4.1a	163.4±2.8a	292.9±1.3b
	平均 Mean	10.1	61.3	132.6	160.7	274.8
显著性 Significance	T	****	****	****	***	****
	Y	ns	****	****	ns	****
	T×Y	ns	****	**	****	****

2.3　一穴多株种植对夏玉米光合势的影响

2013 年各处理的光合势从苗期到成熟期呈现出增加的趋势; 出苗—6 叶展期间 3 个处理的光合势相当; 6 叶展—12 叶展期间 P2 最大, P1 与 P3 相当; 12 叶展—成熟期间呈现出 P1、P3、P2 依次增加的趋势(图 2)。2014 年与 2013 年规律一致(图 2)。可见, 一穴多株种植对 6 叶展以后的光合势有提高效应, 随着株数的增加该效应降低, 对 6 叶展以前没有影响。

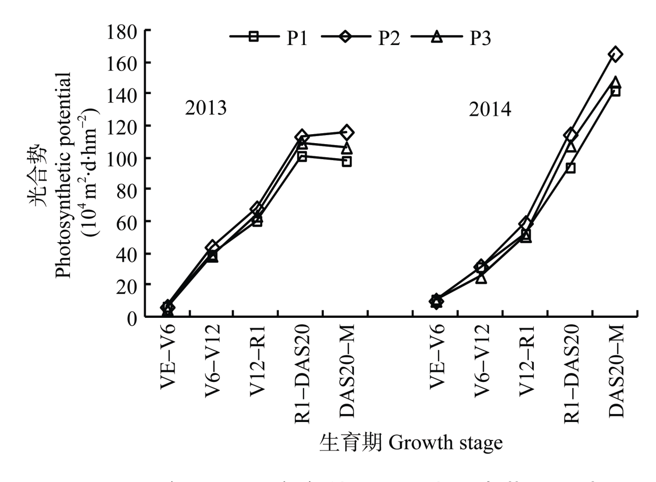


图 2　2013 年和 2014 年各处理夏玉米从出苗到 6 叶展(VE–V6)、6 叶展到 12 叶展(V6–V12)、12 叶展到吐丝(V12–R1)、吐丝到吐丝后 20 d(R1–DAS20)和吐丝后 20 d 到生理成熟(DAS20–M)光合势变化

Fig. 2　Photosynthetic potential of summer maize from emergence to 6-leaf stage (VE–V6), from 6-leaf to 12-leaf stage (V6–V12), from 12-leaf to silking stage (V12–R1), from silking to 20 days after silking stage (R1–DAS20) and from 20 days after silking to physiological maturity stage (DAS20–M) under different treatments in 2013 and 2014

2.4　一穴多株种植对夏玉米相对生长率、净同化率和作物生长速率的影响

2013 年各处理的相对生长率表现出从出苗到成熟逐渐降低的趋势; 出苗—6 叶展期间的相对生长率相当; 6 叶展—12 叶展期间表现出 P2 最大、P3 最小; 12 叶展—吐丝期间表现出 P3、P2、P1 依次增加; 吐丝—吐丝后 20 d 期间 P1 最大, P2 与 P3 相当; 吐丝后 20 d—成熟期间, P2 和 P3 分别是 P1 的 2.9 倍和 2.8 倍(图 3a)。2014 年各处理的相对生长率表现出从出苗到 12 叶展逐渐升高, 从 12 叶展到吐丝后 20 d 急剧下降, 从吐丝后 20 d 到成熟缓慢增加的趋势; 各时期处理间的规律与 2013 年相似(图 3a)。以上分析表明, 一穴多株种植对灌浆后期相对生长率有明显促进作用。

对于净同化率, 2013 年 P1 和 P3 从出苗到成熟表现出下降的趋势; P2 从出苗到吐丝表现出下降的趋势, 从 12 叶展到吐丝后 20 d 表现出升高的趋势, 从吐丝到成熟表现出下降的趋势。出苗—6 叶展期间的净同化率表现出 P1、P2、P3 依次升高的趋势; 6 叶展—12 叶展期间各处理的净同化率相当; 12 叶展—吐丝期间表现出 P1 最大, P2 最小; 吐丝—吐丝后 20 d 和吐丝后 20 d—成熟期间表现出 P2 最大(图 3b)。在 2014 年, P1 的净同化率从出苗到吐丝表现出降低的趋势, 从 12 叶展到吐丝后 20 d 表现出升高的

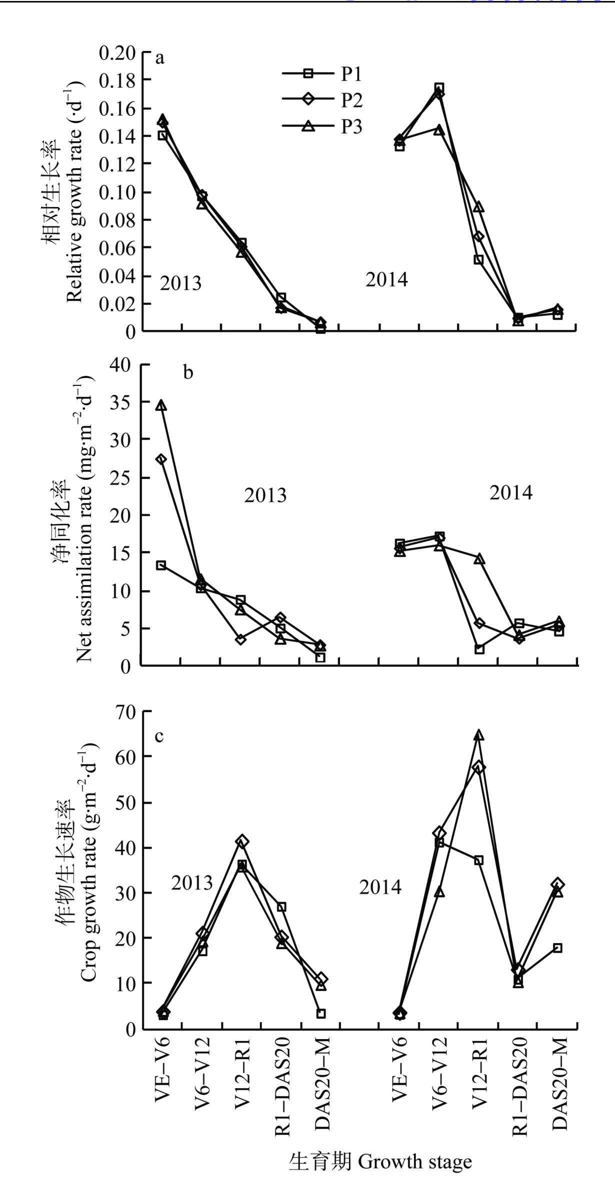


图 3　2013 年和 2014 年各处理夏玉米从出苗到 6 叶展(VE–V6)、6 叶展到 12 叶展(V6–V12)、12 叶展到吐丝(V12–R1)、吐丝到吐丝后 20 d(R1–DAS20)和吐丝后 20 d 到生理成熟(DAS20–M)的相对生长率(a)、净同化率(b)和作物生长速率(c)

Fig. 3　Relative growth rate (a, RGR), net assimilation rate (b, NAR) and crop growth rate (c, CGR) of summer maize from emergence to 6-leaf stage (VE–V6), from 6-leaf to 12-leaf stage (V6–V12), from 12-leaf to silking stage (V12–R1), from silking to 20 days after silking stage (R1–DAS20) and from 20 days after silking to physiological maturity stage (DAS20–M) under different treatments in 2013 and 2014

趋势，从吐丝到成熟表现出降低趋势；P2 和 P3 从出苗到吐丝后 20 d 表现出降低的趋势，从吐丝到成熟表现出逐渐升高的趋势；出苗—6 叶展和 6 叶展—12 叶展期间各处理的净同化率相当，12 叶展—吐丝期间表现出 P1、P2、P3 依次增加，吐丝—吐丝后 20 d 期间表现出 P1 最大、P2 最低，吐丝后 20 d—成熟期间 P2 和 P3 分别比 P1 高 16.1%和 30.7%(图 3b)。两年的试验结果表明，一穴多株种植可以提高灌浆后期的净同化率。

对于作物生长速率，2013 年各处理表现出从出苗到吐丝逐渐升高，而后缓慢下降的趋势；出苗—6 叶展期间表现出 P1、P2、P3 依次增大，6 叶展—12 叶展和吐丝后 20 d—成熟期间表现出 P2 最大、P1 最小，12 叶展—吐丝期间表现出 P2 最大、P1 与 P3 相当，吐丝—吐丝后 20 d 期间表现出 P3、P2、P1 依次增加的趋势(图 3c)。在 2014 年，各处理作物生长速率都表现为从出苗到 12 叶展(或吐丝)升高的趋势，从 12 叶展(或吐丝)到吐丝后 20 d 降低的趋势，而后缓慢升高；各时期的绝对生长率都表现出 P2 大于 P1(图 3c)。可见，一穴多株种植可以提高作物生长速率。

2.5　一穴多株种植对夏玉米粒叶比的影响

2013 年和 2014 年的粒重/叶面积表现出 P1、P3、P2 依次增加(图 4a)。2013 年 P2 和 P3 的粒数/叶面积比 P1 分别高 4.7%和 2.4%，2014 年分别提高 27.1%和 5.4%(图 4b)。可见，一穴 2 株和一穴 3 株种植模式下，夏玉米的粒叶比得到提高。

2.6　一穴多株种植对夏玉米产量和产量构成因素的影响

在 2013 年，P2 的穗数显著(P<0.05)高于 P1 和 P3，P3 显著(P<0.05)低于 P1；P2 的穗粒数比 P1 和 P3 分别多 8.3%和 5.6%；P2 的千粒重显著(P<0.05)高于 P1 和 P3，P1 与 P3 之间差异不显著；P2 和 P3 的产量分别比 P1 高 5.8%和 4.9%；P2、P1、P3 的空秆率依次增加(表 3)。在 2014 年，P2 的穗数和穗粒数最多，P3 最少；P2 和 P3 的千粒重显著(P<0.05)高于对照 P1；产量、空秆率与 2013 年规律一致(表 3)。2014 年除了空秆率的均值小于 2013 年外，产量和产量三要素

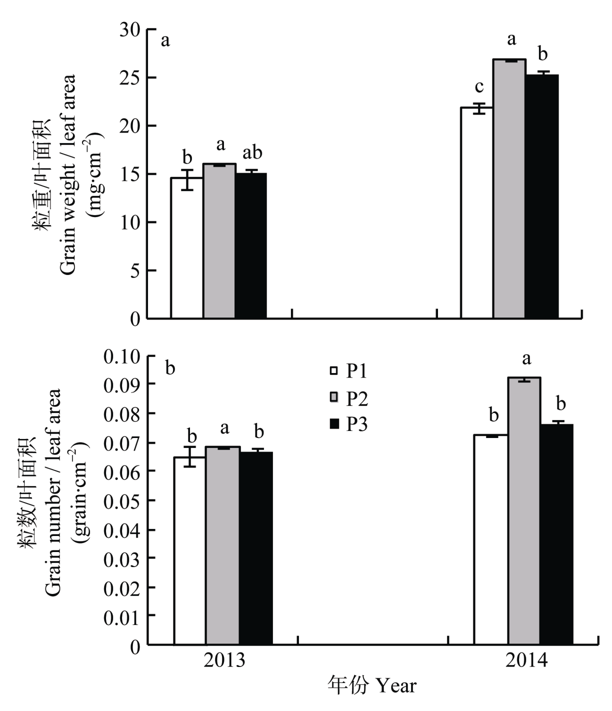


图 4　2013 年和 2014 年各处理夏玉米粒重/叶面积(a)和粒数/叶面积(b)

Fig. 4　Ratios of grain weight/leaf area (a) and grain number/leaf area (b) of summer maize under all the treatments in 2013 and 2014

不同小写字母表示在 5%水平差异显著。Values are means ± S.E. Bars with different letters are significant difference at 5% level.

表 3　一穴多株种植对夏玉米产量、穗数、穗粒数、千粒重和空秆率的影响

Table 3　Effects of more plants per hill on yield, ear number, grain number, thousand-grain weight (TGW) and empty stalk ratio of summer maize

年份 Year (Y)	处理 Treatment (T)	穗数 Ear number (ear·hm^{-2})	穗粒数 Grain number per ear	千粒重 TGW (g)	产量 Yield (kg·hm^{-2})	空秆率 Empty stalk ratio
2013	P1	73 913.3±39.6b	445.4±8.2b	219.8±1.2b	6 936.9±50.6b	0.10±0.01b
	P2	75 609.5±87.6a	482.2±5.6a	238.1±0.9a	7 336.7±30.0a	0.08±0.00c
	P3	66 017.3±45.8c	456.5±7.8b	226.2±1.0b	7 275.1±32.7a	0.20±0.00a
	Mean	71 846.7	461.4	228	7 182.9	0.13
2014	P1	80 434.8±90.3a	537.5±6.8a	291.0±0.8c	8 842.1±58.9b	0.03±0.00b
	P2	80 713.0±98.5a	543.3±1.2a	330.2±0.6a	10 917.4±86.6a	0.02±0.00c
	P3	78 867.3±36.7b	493.5±2.0b	301.8±1.4b	10 509.3±66.7a	0.04±0.00a
	Mean	80 005.1	524.7	307.7	10 089.6	0.03
显著性 Significance	T	****	****	****	****	****
	Y	****	****	****	****	****
	T×Y	****	***	***	**	***

均高于 2013 年。处理(T)和年份(Y)对穗数、穗粒数、千粒重、产量和空秆率有显著影响(P<0.000 1); 处理×年份(P×Y)对穗数(P<0.000 1)、穗粒数(P<0.001)、千粒重(P<0.001)、产量(P<0.01)和空秆率(P<0.001)有显著影响(表 3), 表明每年的温度、光照时数、降水等气象条件是造成年际间产量和产量三要素差异的主要原因, 处理及其与年份的互作效应对产量和产量构成要素有显著影响(表 3)。可见, 一穴 2 株种植可以显著提高产量, 改善产量构成要素; 一穴 3 株种植对收获穗数有降低效应, 对产量、粒重和空秆率有增加效应。

3　讨论

玉米是中国第一大粮食作物, 其总产量占中国谷物总产量 1/3, 占世界玉米外贸出口的 19%[20]。因此, 有关玉米高产的研究一直是科学研究的热点。现代玉米杂交种单位面积产量的提高, 主要归因于最佳种植密度的增加, 而不是单株产量的提高[21]。同时, 许多学者认为只有通过高密种植才能实现玉米的进一步高产[4,22–23]。事实上, 在较高的种植密度下没有得到理想的产量, 反而降低了产量。因为种植密度过高会导致玉米散粉吐丝间隔期延长、籽粒败育增加、穗粒数降低、空秆率增加[21]。另外, 高密种植还会导致同化物的供应不足, 致使秃尖长增加[24]。不过, 在高密种植情况下, 采用一穴 2 株的种植方式要比采用一穴 1 株的种植方式, 秃尖长明显缩短、行粒数和穗长明显增加[25], 穗部性状改善, 产量提高, 一穴 2 株比一穴 1 株产量提高 5.8%~23.5%。表 4 表明, 产量和产量三要素与 6 叶展–12 叶展和吐丝后 20 d—成熟期的光合势、相对生长率、净光合同化率和作物生长速率有显著相关性。因此, 产量的提高可能与群体结构和功能的改善有关。

叶片是群体的主要组成部分和光合作用的主要器官, 叶面积大小、功能期长短、光合效率高低、光合产物的积累与分配决定作物的群体产量[26], 随种植密度升高, 玉米个体叶面积呈下降趋势, 群体叶面积呈增长趋势, 且高低种植密度间的相差较大。本试验表明, 在种植密度不变的情况下采用一穴 2 株或一穴 3 株种植方式可以增加夏玉米吐丝前的叶面积, 延缓吐丝后叶面积的下降, 为花前的物质积累和花后的籽粒灌浆保证了足够的光合叶面积。

表 4　夏玉米穗数、穗粒数、千粒重、产量、空秆率与不同生育期光合势、相对生长率、净同化率和作物生长速率的相关性

Table 4　Correlations between ear number (EN), grain number per ear (GN), thousand-grain weight (TGW), yield, empty stalk ratio (ESR), and photosynthetic potential (PP) , relative growth rate (RGR), net assimilation rate (NAR) and crop growth rate (CGR) of summer maize at different growth stages

		生育期 Growth stage				
		VE–V6	V6–V12	V12–R1	R1–DAS20	DAS20–M
PP	穗数 EN	0.90^{****}	-0.57^{*}	-0.58^{*}	−0.16	0.79^{***}
	穗粒数 GN	0.83^{****}	-0.54^{*}	-0.47^{*}	−0.04	0.89^{****}
	千粒重 TGW	0.90^{****}	-0.79^{***}	-0.64^{**}	0.09	0.99^{****}
	产量 Yield	0.92^{****}	-0.67^{**}	−0.68	−0.31	0.85^{****}
	空秆率 ESR	0.90^{****}	-0.57^{*}	−0.58	−0.16	0.79^{***}
RGR	穗数 EN	-0.81^{****}	0.83^{****}	0.29	-0.63^{**}	0.66^{*}
	穗粒数 GN	-0.64^{*}	0.93^{****}	−0.02	-0.78^{***}	0.78^{***}
	千粒重 TGW	-0.70^{*}	0.92^{****}	0.40	-0.86^{****}	0.92^{****}
	产量 Yield	-0.82^{*}	0.97^{****}	0.03	-0.72^{****}	0.73^{****}
	空秆率 ESR	-0.81^{****}	0.83^{****}	0.29	-0.63^{*}	0.66^{*}
NAR	穗数 EN	-0.77^{***}	0.73^{***}	−0.12	0.20	0.64^{**}
	穗粒数 GN	-0.38^{*}	0.88^{****}	−0.38	−0.01	0.76^{***}
	千粒重 TGW	-0.54^{*}	0.93^{****}	0.05	−0.26	0.90^{****}
	产量 Yield	-0.61^{**}	0.91^{****}	−0.26	−0.06	0.70^{**}
	空秆率 ESR	-0.77^{***}	0.73^{***}	−0.12	0.20	0.64^{**}
GGR	穗数 EN	-0.51^{*}	0.78^{***}	0.55^{*}	-0.57^{*}	0.66^{**}
	穗粒数 GN	−0.21	0.96^{****}	0.41	-0.75^{***}	0.74^{***}
	千粒重 TGW	−0.17	0.93^{****}	0.75^{***}	-0.80^{****}	0.94^{****}
	产量 Yield	−0.43	0.95^{****}	0.38	-0.71^{***}	0.69^{**}
	空秆率 ESR	-0.51^{*}	0.78^{***}	0.55^{*}	-0.57^{*}	0.66^{**}

VE: 出苗期。*、**、***和****分别表示在 P<0.05、P<0.01、P<0.001 和 P<0.000 1 水平上显著相关。VE: emergence stage of maize. *, **, *** and **** mean significant correlation at P < 0.05, P < 0.01, P < 0.001 and P < 0.000 1, respectively.

群体通过对光合有效辐射的截获和吸收影响作物光合特性，并直接影响每个生育期的净同化率[4]。两年的试验结果表明，一穴 2 株和一穴 3 株处理吐丝后光合势(PP)与一穴 1 株相比明显提高，因而灌浆中后期的净同化率(NAR)、作物生长速率(CGR)和相对生长率(RGR)均高于一穴 1 株。穗数、穗粒数、千粒重和产量与吐丝后 20 d 到成熟期的 PP、NAR、CGR、RGR 显著正相关。可见，一穴 2 株通过增加后期干物质积累，提高了粒重，进而提高了籽粒产量。魏姗姗等[27]研究表明 75 000 株·hm^{-2} 种植密度下宽窄行每穴 2 株种植改善了冠层内部光照状况，净光合速率和叶面积指数均有所提高，同时缓解了植株个体与群体间的矛盾，籽粒灌浆能力增强，干物质积累量提高。我们采用等行距一穴 2 株种植也显著提高了籽粒的灌浆速率和粒重[25]。朱金城等[28]研究发现‘先玉 335’采用一穴 3 株种植也可以促进花后干物质积累量，但并没有改善群体的透光率和叶面积。但李宗新等[29]研究表明, 60 000 株·hm^{-2} 下‘鲁单 981’的群体结构质量和功能较优，双株种植可缓解其冠层竞争，根、冠协调，表现增产；在 90 000 株·hm^{-2} 下，‘鲁单 818’的群体结构质量和功能较优，双株种植可缓解其根系竞争，部分改善冠层群体结构质量和功能，根、冠协调，表现增产。

粒叶比是衡量夏玉米群体库源协调水平的综合指标。高产群体需要源库关系在高水平上取得动态平衡[30−31]。经过两年的试验发现，一穴 2 株和一穴 3 株的粒重/叶面积比对照一穴 1 株分别高 9.7%~22.5%和 3.6%~15.3%，粒数/叶面积比一穴 1 株分别高 4.7%~27.1%和 2.4%~5.4%(表 4)，所以导致这两种种植方式的产量显著高于对照；同时研究发现，籽粒产量与粒重/叶面积(R^2=0.94，P<0.000 1)和粒数/叶面积(R^2=0.76，P<0.001)呈显著直线正相关(图 5)，丁锦峰等[32]在水稻上发现了类似的规律。这说明高的粒叶比是一穴 2 株和一穴 3 株种植获得较高籽粒产量的一个原因。可见，一穴 2 株和一穴 3 株产量的提高应该归功于群体质量(叶面积、光合势、相对生长率、净同化率、作物生长速率和粒叶比)的改善。

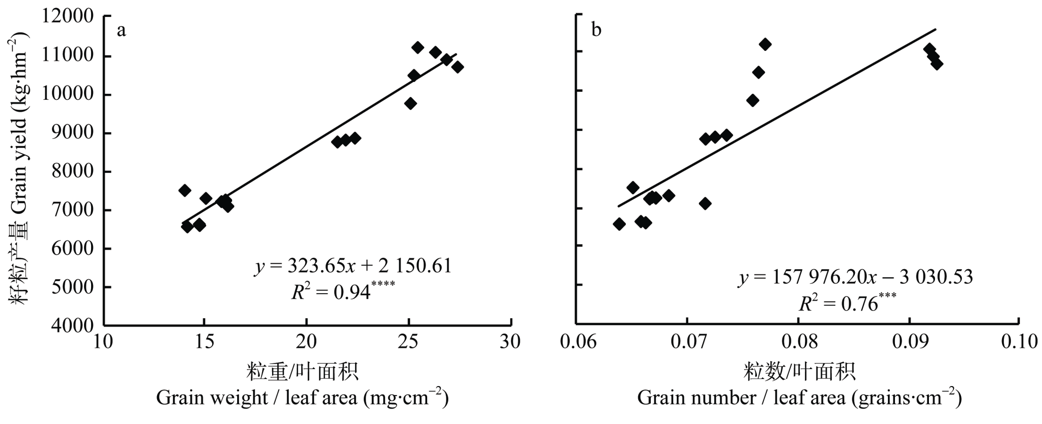


图 5 产量与粒重/叶面积(a)和粒数/叶面积(b)的相关关系

Fig. 5 Correlation between grain yield and grain weight/leaf area (a) and grain number/leaf area (b) ratios

和*分别表示 P<0.001 和 P<0.000 1 水平显著相关。*** and **** mean significant correlation at P < 0.001 and P < 0.000 1, respectively.

4 结论

本研究通过两年大田试验研究结果表明，一穴多株种植可以提高玉米吐丝前叶面积，延缓吐丝后叶面积的下降，增加吐丝期和成熟期的干物质积累量和 6 叶展以后的光合势，促进生长，提高粒重和粒叶比，最终提高籽粒产量。一穴多株种植对夏玉米群体质量和产量的改善效应随穴内株数的增加而减弱，因此本研究认为高密度下采用一穴 2 株的种植方式能获得较高的产量。

参考文献 References

[1] Engledow F L, Wadham S M. Investigations on yield in the cereals. Ⅰ[J]. The Journal of Agricultural Science, 1923, 13(4): 390–439

[2] Johnson D R, Tanner J W. Comparisons of corn (*Zea mays* L.) inbreds and hybrids grown at equal leaf area index, light penetration and population[J]. Crop Science, 1972, 12(4): 482–485

[3] 王云奇, 陶洪斌, 王璞, 等. 施氮模式对夏玉米产量和籽粒灌浆的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(12): 1594–1598
Wang Y Q, Tao H B, Wang P, et al. Effect of nitrogen application patterns on yield and grain-filling of summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(12): 1594–1598

[4] Tajul M I, Alam M M, Hossain S M M, et al. Influence of plant population and nitrogen-fertilizer at various levels on

growth and growth efficiency of maize[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 193018

[5] 沈秀瑛, 戴俊英, 胡安畅, 等. 玉米群体冠层特征与光截获及产量关系的研究[J]. 作物学报, 1993, 19(3): 246–252
Shen X Y, Dai J Y, Hu A C, et al. Studies on relationship among character of canopy light interception and yield in maize populations (*Zea mays* L.)[J]. Acta Agronomica Sinica, 1993, 19(3): 246–252

[6] 王庆祥, 顾慰连, 戴俊英. 玉米群体的自动调节与产量[J]. 作物学报, 1987, 13(4): 281–287
Wang Q X, Gu W L, Dai J Y. Effect of population autoregulation on yield in maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 1987, 13(4): 281–287

[7] 徐恒永, 赵君实. 高产冬小麦的冠层光合能力及不同器官的贡献[J]. 作物学报, 1995, 21(2): 204–209
Xu H Y, Zhao J S. Canopy photosynthesis capacity and the contribution from different organs in high-yielding winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 1995, 21(2): 204–209

[8] Tollenaar M, Wu J. Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance[J]. Crop Science, 1999, 39(6): 1597–1604

[9] Echarte L, Luque S, Andrade F H, et al. Response of maize kernel number to plant density in Argentinean hybrids released between 1965 and 1993[J]. Field Crops Research, 2000, 68(1): 1–8

[10] Sangoi L, Gracietti M A, Rampazzo C, et al. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density[J]. Field Crops Research, 2002, 79(1): 39–51

[11] Casal J J. Canopy light signals and crop yield in sickness and in health[J]. ISRN Agronomy, 2013, 2013: 650439

[12] 杨利华, 张丽华, 张全国, 等. 种植样式对高密度夏玉米产量和株高整齐度的影响[J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 122–124
Yang L H, Zhang L H, Zhang Q G, et al. Effect of row spacing pattern on yield and plant height uniformity in highly-densed summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(6): 122–124

[13] 胡瑞林. 夏播玉米密度试验[J]. 陕西农业科学, 1960(5): 198–201
Hu R L. Experiment on density of summer maize[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 1960(5): 198–201

[14] 谭秀山, 毕建杰, 刘建栋, 等. 玉米种植方式的发展趋势[J]. 山东农业科学, 2010(5): 57–58
Tan X S, Bi J J, Liu J D, et al. Development trends of maize planting patterns[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2010(5): 57–58

[15] Timlin D J, Fleisher D H, Kemanian A R, et al. Plant density and leaf area index effects on the distribution of light transmittance to the soil surface in maize[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(5): 1828–1837

[16] Arking R. Independent chemical regulation of health and senescent spans in Drosophila[J]. Invertebrate Reproduction & Development, 2015, 59(S1): 28–32

[17] Coulis M, Bernard L, Gérard F, et al. Endogeic earthworms modify soil phosphorus, plant growth and interactions in a legume-cereal intercrop[J]. Plant and Soil, 2014, 379(1/2): 149–160

[18] 郭庆法, 王庆成, 汪黎明. 中国玉米栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004: 400–405, 763–776
Guo Q F, Wang Q C, Wang L M. Chinese Maize Cultivation[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2004: 400–405, 763–776

[19] SAS Institute. SAS/STAT Version 9.0, User's Guide[M]. SAS Institute, 2002

[20] FAO. FAOSTAT-Agriculture Database[EB/OL]. FAO Network. [2012-12-25]. http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx (verified on 27.02.12)

[21] Tokatlidis I S, Koutroubas S D. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability[J]. Field Crops Research, 2004, 88(2/3): 103–114

[22] 钱春荣, 于洋, 宫秀杰, 等. 黑龙江省不同年代玉米杂交种产量对种植密度和施氮水平的响应[J]. 作物学报, 2012, 38(10): 1864–1874
Qian C R, Yu Y, Gong X J, et al. Response of grain yield to plant density and nitrogen application rate for maize hybrids released from different eras in Heilongjiang Province[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(10): 1864–1874

[23] 宋振伟, 齐华, 张振平, 等. 春玉米中单 909 农艺性状和产量对密植的响应及其在东北不同区域的差异[J]. 作物学报, 2012, 38(12): 2267–2277
Song Z W, Qi H, Zhang Z P, et al. Effects of plant density on agronomic traits and yield in spring maize Zhongdan 909 and their regional differences in Northeast China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(12): 2267–2277

[24] Raun W R, Solie J B, Johnson G V, et al. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(4): 815–820

[25] 王云奇, 张英华, 宋文品, 等. 一穴多株种植对夏玉米籽粒灌浆和产量的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(5): 117–123
Wang Y Q, Zhang Y H, Song W P, et al. Grain filling and yield of summer maize under planting pattern of more plants per hill[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(5): 117–123

[26] 胡昌浩, 董树亭, 岳寿松, 等. 高产夏玉米群体光合速率与产量关系的研究[J]. 作物学报, 1993, 19(1): 63–69
Hu C H, Dong S T, Yue S S, et al. Studies on the relationship between canopy apparent photosynthesis rate and grain yield in high yielding summer corn (*Zea may* L.)[J]. Acta Agronomica Sinica, 1993, 19(1): 63–69

[27] 魏珊珊, 王祥宇, 董树亭. 株行距配置对高产夏玉米冠层结构及籽粒灌浆特性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 441–450
Wei S S, Wang X Y, Dong S T. Effects of row spacing on canopy structure and grain-filling characteristics of high-yield summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014,

25(2): 441–450

[28] 朱金城, 陶洪斌, 盛耀辉, 等. 品种、空间布局及种植密度对春玉米冠层结构、物质生产及产量的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(2): 99–105

Zhu J C, Tao H B, Sheng Y H, et al. Effects of cultivar, space distribution and planting density on plant canopy, dry matter production and grain yield of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(2): 99–105

[29] 李宗新, 陈源泉, 王庆成, 等. 密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7391–7401

Li Z X, Chen Y Q, Wang Q C, et al. Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7391–7401

[30] 卢百关, 杜永, 李筠, 等. 黄淮地区稻茬小麦超高产群体特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 43–51

Lu B G, Du Y, Li J, et al. Population characteristics of super-high-yielding wheat under rice stubble in Huanghuai area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(1): 43–51

[31] 朱新开, 郭文善, 何建华, 等. 淮南麦区超高产小麦产量形成特点及其生理特性分析[J]. 麦类作物学报, 1998, 18(6): 40–44

Zhu X K, Guo W S, He J H, et al. Yield formation and physiological characteristics of super high yield wheat in north part of Huaihe River region[J]. Journal of Triticeae Crops, 1998, 18(6): 40–44

[32] 丁锦峰, 黄正金, 袁毅, 等. 稻–麦轮作下 9000 kg·hm^{-2} 产量水平扬麦 20 的群体质量及花后光合特征[J]. 作物学报, 2015, 41(7): 1086–1097

Ding J F, Huang Z J, Yuan Y, et al. Population quality and photosynthetic characteristics after anthesis in Yang-mai 20 with yield potential of 9000 kg·ha^{-1} in rice-wheat rotation system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(7): 1086–1097